УДК 519.876.5:004.94

СТЕЦЕНКО И.В.

ФОРМАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМ СРЕДСТВАМИ ПЕТРИ-ОБЪЕКТНЫХ МОДЕЛЕЙ

В статье рассматривается новый способ формального описания систем, основывающийся на объектно-ориентированной технологии и стохастической временной сети Петри. Получены уравнения состояний стохастической временной сети Петри с конфликтными и многоканальными переходами. Предложено понятие Петри-объекта и разработана технология конструирования имитационной модели системы с использованием Петри-объектов.

The article considers the new formal methods for system's description based on object-oriented methodology and stochastic timed Petri net. The state equation of stochastic timed Petri net with conflict and multi-transitions is received. The concept of Petri-object is proposed and construction technology of simulation model with Petri-objects using is developed.

Введение

Модели сетей Петри являются универсальным средством формализации процессов функционирования дискретно-событийных систем. Однако их использование для целей имитационного моделирования ограничено, во-первых, тем, что приходится использовать большое количество элементов даже для простых систем, во-вторых, тем, что отсутствие математической теории стохастических временных сетей Петри приводит к разнообразию подходов к построению алгоритмов имитации. В [1], [2] предлагается использовать блочную структуру построения моделей сетей Петри, что позволяет создавать подобные фрагменты сетей Петри простым копированием или вставкой соответствующего блока. Это в определенной степени облегчает составление моделей, но все же не решает проблему в случае, когда система состоит из сотен подобных элементов, взаимосвязанных между собой. В [3] предлагается разбивать большую сеть Петри на функциональные подсети, что позволяет исследовать вместо свойств сети Петри свойства ее подсетей.

В последнее время появляются научные работы, в которых рассматривается объединение объектно-ориентированного подхода и моделирования сетями Петри тем или иным способом в зависимости от задачи, которая решается ([4],[5],[6],[12]). Так, термин „объектно-ориентированные сети Петри (object oriented Petri net, OPN)" закрепился за расширенным понятием сети Петри, в котором существуют специфические элементы сети Петри (позиции, переходи или маркеры), выполняющие функции объединения составляющих частей (которые и являются объектами) сети Петри [4]. Одной из реализаций этого подхода является язык LOOPN Чарльза Лакоса, в котором термин объектно-ориентированная сеть Петри означает, что маркеры сети Петри являются объектами в терминах объектно-ориентированного программирования, а также отдельные фрагменты сети Петри могут служить объектами [5]. Термин „иерархическая объектно-ориентированная сеть Петри с временными задержками (timed hierarchical object-oriented Petri net)" введен в работе [6] . Есть также публикации, в которых объекты и методы представляют сетями Петри с целью перевести объектно-ориентированный подход в язык сетей Петри [7].

Во всех разработках сеть Петри модифицируется тем или другим способом, чтобы приспособить ее к требованиям объектно-ориентированной парадигмы. Эти модификации приводят к значительному усложнению инструмента сетей Петри. Кроме этого, указанные подходы позволяют реализовывать большие сети Петри только теоретически.

В настоящей работе разработана технология моделирования систем, которая, в отличие от существующих технологий, позволяет создавать модели больших систем средствами стохастических временных сетей Петри с конфликтными и многоканальными переходами.

Уравнения состояний стохастической временной сети Петри с конфликтными и многоканальными переходами

Рассмотрим сеть Петри $\text{PetriNet} = (\mathbf{P}, \mathbf{T}, \mathbf{A}, \mathbf{W}, \mathbf{K}, \mathbf{I}, \mathbf{R})$, заданную множеством позиций $\mathbf{P} = \{P\}$; множеством переходов $\mathbf{T} = \{T\}$, $\mathbf{P} \cap \mathbf{T} = \varnothing$; множеством дуг

$\mathbf{A} \subseteq (\mathbf{P} \times \mathbf{T} \bigcup \mathbf{T} \times \mathbf{P})$; множеством натуральных чисел $\mathbf{W} : \mathbf{A} \bigcup \mathbf{I} \to \mathrm{N}$, задающих кратности дуг (количество связей); множеством пар значений $\mathbf{K} = \{(c_T, b_T) \mid T \in \mathbf{T}, c_T \in N, b_T \in [0;1]\}$, задающих приоритет и вероятность запуска переходов; множеством неотрицательных действительных значений $\mathbf{R} : \mathbf{T} \to \Re_+$, характеризующих временные задержки в переходах.

Для обозначения множества входных и множества выходных позиций перехода T будем пользоваться обозначениями, предложенными в [8], – ${}^{\bullet}T$ и $T^{\bullet}$ соответственно, множества входных переходов и множества выходных переходов позиции P – ${}^{\bullet}P$ и $P^{\bullet}$ соответственно.

Формальное описание стохастической временной сети Петри получено на основе уравнений состояний базовой сети Петри [8] и формального описания временной сети Петри с детерминированными временными задержками, которое содержится в работе [9].

Состояние сети Петри в момент времени t описывается состоянием ее позиций $\mathbf{M}(t)$ и состоянием ее переходов $\mathbf{E}(t)$: $(\mathbf{M}(t), \mathbf{E}(t)) = \mathbf{S}(t)$. Состояние позиций однозначно определяется маркировкой сети Петри в момент времени t: $\mathbf{M}(t) = \{M_P(t) \mid M_P(t) \in Z_+, P \in \mathbf{P}\}$, где Z_+ – множество целых неотрицательных чисел. Состояние переходов определяется множеством $\mathbf{E}(t) = \{E_T(t) \mid T \in \mathbf{T}\}$, где состояние каждого перехода $E_T(t)$ определяется множеством моментов выхода из переходов маркеров, которые на момент времени t находятся в переходе:

$$E_T(t) = \{ [E_T(t)]_q \mid [E_T(t)]_q \in \Re_+, q \in \mathrm{N} \tag{1}$$

где q – номер канала перехода, $q = 1,2 \ldots |E_T(t)|$, $|E_T(t)|$ – количество занятых (активных) каналов в момент времени t.

Если выход маркеров из перехода не ожидается, что соответствует пустому (не активному) переходу, то множество $E_T(t)$ этого перехода содержит только одно значение ∞, означающее, что «в ближайшее время не ожидается выход маркеров из перехода»:

$$E_T(t) = \{\infty\} \tag{2}$$

Функционирование временной сети Петри заключается в выполнении упорядоченной во времени последовательности событий, соответствующих ее переходам. Рассмотрим моменты времени $t_0, t_1, \ldots t_n \ldots$ такие, что: $\forall t \in (t_{n-1}, t_n)$ $\mathbf{S}(t) = \mathbf{S}(t_{n-1})$ т.е. изменение состояния сети Петри в интервале времени (t_{n-1}, t_n) не происходит.

В каждый момент времени t_{n-1} определяется момент возникновения ближайшего события, и время продвигается в этот момент времени t_n:

$$t_n = \min_T \left(\min_q [E_T(t_{n-1})]_q \right), t_n \ge t_{n-1} \tag{3}$$

Преобразование $D^+ : \mathbf{S}(t_{n-1}) \to \mathbf{S}(t_n)$ сети Петри, соответствующее выходу маркеров из переходов имеет вид:

$$\begin{aligned} &\forall P \in \mathbf{P} \;\; M_P^+(t_n) = \\ &= M_P(t_{n-1}) + \sum_{T \in {}^{\bullet}P} Y(T, t_n) \cdot W_{T,P} \mid s_T(t_{n-1}) \mid \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} &\forall T \in \mathbf{T} \mid Y(T, t_n) = 1 \\ &E_T^+(t_n) = \\ &= \begin{cases} \{\infty\} \text{ if } |s_T(t_{n-1})| = |E_T(t_{n-1})|, \\ E_T(t_{n-1}) \setminus \{[E_T(t_{n-1})]_q \mid q \in s_T(t_{n-1})\} \text{ else.} \end{cases} \end{aligned} \tag{5}$$

где $s_T(t)$ – множество каналов перехода, которым соответствует наименьший из всех моментов выхода маркеров из перехода, $s_T(t) = \{q \in \mathrm{N} \mid [E_T(t)]_q = \min_q [E_T(t)]_q\}$, $Y(T, t_n)$ – предикат, определяющий множество переходов $T \in \mathbf{T}$, для которых осуществляется выход маркеров в момент времени $t_n \in \Re$:

$$\begin{aligned} &\left(\min_q [E_T(t_{n-1})]_q = t_n \right) \Rightarrow Y(T, t_n) = 1 \\ &\left(\min_q [E_T(t_{n-1})]_q \ne t_n \right) \Rightarrow Y(T, t_n) = 0 \end{aligned} \tag{6}$$

Преобразование $D^- : \mathbf{S}(t_n) \to \mathbf{S}(t_n)$ сети Петри, соответствующее входу маркеров в переходы сети Петри имеет вид:

$$\begin{aligned} &\forall P \in \mathbf{P} \;\; M_P(t_n) = \\ &= M_P^+(t_n) - \sum_{T \in P^{\bullet}} W_{P,T} \cdot X(T, t_n) \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} &\forall T \in \mathbf{T} \mid X(T, t_n) = 1 \\ &E_T(t_n) = \\ &= \begin{cases} \{t_n + R_T\} \text{ if } \min_q [E_T(t_{n-1})]_q = \infty, \\ E_T^+(t_n) \bigcup \{t_n + R_T\} \text{ else.} \end{cases} \end{aligned} \tag{8}$$

где $X(T, t_n)$ – предикат, определяющий множество переходов $T \in \mathbf{T}$, для которых осуществляется вход маркеров в момент времени $t_n \in \Re$:

$$T \in \Psi'(t_n) \Rightarrow X(T,t_n) = 1, \quad T \notin \Psi'(t_n) \Rightarrow X(T,t_n) = 0. \tag{9}$$

Множество $\Psi'(t_n)$ представляет подмножество множества переходов с выполненным условием запуска, которое формируется в результате выбора из конфликтных переходов, основывающегося на значениях приоритетов и вероятностей запуска переходов.

Преобразование $D^-(\mathbf{S}(t_n))$ представляет результат одного входа маркеров в переходы сети Петри. Количество маркеров во входных позициях многоканального перехода может позволять запуск не одного, а нескольких каналов этого перехода. Поэтому вход маркеров в переходы должен осуществляться многократно до тех пор, пока еще есть хоть один переход, который запускается. В противном случае может возникнуть ситуация, когда условие запуска перехода выполнено, но он не запущен в момент t_n и в результате продвижения времени сможет быть запущен только в момент времени $t > t_n$, что противоречит правилам функционирования временных сетей Петри.

Максимальное количество запусков перехода в момент времени t_n определяется величиной $\min\limits_{P \in {}^\bullet T} \left\{ \dfrac{M_P^+(t_n)}{W_{P,T}} \right\}$, где операция деления является операцией деления целых чисел. Фактическое количество m входов маркеров в переходы обусловлено требованием, что в результате достигается маркировка сети Петри, в которой ни один из переходов не запускается:

$$m : \left(D^-\right)^m (\mathbf{S}(t_n)) : \bigvee_{\mathrm{T}} Z(T,t_n) = 0 \tag{10}$$

где $\left(D^-\right)^m = D^- \circ D^- \circ D^- ... \circ D^-$ - результат m -кратного применения преобразования D^-, $Z(T,t_n)$ – предикат, определяющий множество переходов $T \in \mathbf{T}$ с выполненным условием запуска в момент времени $t_n \in \Re$:

$$\begin{aligned} &\left(\forall P \in {}^\bullet T \quad M_P^+(t_n) \ge W_{P,T}\right) \Rightarrow Z(T,t_n) = 1 \\ &\left(\exists P \in {}^\bullet T \quad M_P^+(t_n) < W_{P,T}\right) \Rightarrow Z(T,t_n) = 0 \end{aligned} \tag{11}$$

Пусть вектор $u_T(t_n) = \sum\limits_{i=1}^{m} X(T,t_n)_i$ представляет количество входов маркеров в переход T в серии входов маркеров в переходы $\left(D^-\right)^m$, соответствующей моменту времени t_n. Тогда преобразование $\left(D^-\right)^m$ описывается следующими уравнениями изменения состояния сети Петри:

$$\forall P \in \mathbf{P} \quad M_P(t_n) = M_P^+(t_n) - \sum_{T \in {}^\bullet P} W_{P,T} \cdot u_T(t_n), \tag{12}$$

$$\forall T \in \mathbf{T} \quad E_T(t_n) = \begin{cases} \underbrace{\{t_n + R_T\} \cup ... \cup \{t_n + R_T\}}_{u_T(t_n)} & if \ \min\limits_q [E_T(t_{n-1})]_q = \infty, \\ E_T^+(t_n) \cup \underbrace{\{t_n + R_T\} \cup ... \cup \{t_n + R_T\}}_{u_T(t_n)} & else. \end{cases} \tag{13}$$

Отметим, что множество значений $\{u_T(t_n)\}$ в общем случае зависит от случайного выбора перехода из множества запускающихся переходов.

Таким образом, имеем следующие уравнения состояний, описывающие функционирование стохастической временной сети Петри с многоканальными и конфликтными переходами:

$$t_n = \min_T \left(\min_q [E_T(t_{n-1})]_q \right), t_n \ge t_{n-1}, \tag{14}$$

$$\mathbf{S}(t_0) = \left(D^-\right)^m (\mathbf{S}(t_0)), \tag{15}$$

$$\mathbf{S}(t_n) = \left(D^-\right)^m \left(D^+(\mathbf{S}(t_{n-1})\right), n = 1,2..., \tag{16}$$

где преобразование $D^+ : \mathbf{S}(t_{n-1}) \to \mathbf{S}(t_n)$ описывается формулами (4),(5), преобразование $\left(D^-\right)^m : \mathbf{S}(t_n) \to \mathbf{S}(t_n)$ описывается формулами (12),(13) и условием (10).

Уравнения (14)-(16), которые получены, являются полным математическим описанием алгоритма функционирования временной стохастической сети Петри: уравнение (14) задает продвижение времени, уравнение (15) – преобразование состояния сети Петри, соответствующее начальному моменту времени, а уравнение (16) – преобразование состояния сети Петри, соответствующее всем следующим после начального моментам времени. Поскольку начальное состояние сети Петри обычно задается так, что маркеры находятся только в позициях (и не находятся в переходах), то в начальный момент времени осуществляется вход маркеров в переходы. Во все другие моменты времени осуществляется выход и вход маркеров в переходах.

Хотя уравнения (14)-(16) не накладывают никаких ограничений на размерность сети Петри, тем не менее, реализация с их помощью больших сетей Петри, содержащих сотни элементов, приводит к непреодолимым трудностям, связанным с проверкой правильности составления сети Петри и отладкой алгоритма имитации. Для решения этой проблемы предлагается конструировать сеть Петри, моделирующей систему в целом, из фрагментов сети Петри, моделирующих элементы системы.

Понятие Петри-объекта

Объектно-ориентированная технология обладает важным свойством создания десятков, сотен и тысяч похожих элементов по одному образцу и справляется с воссозданием структуры очень сложных систем. Однако для того, чтобы объекты могли применяться для воссоздания не только структуры, но и динамики сложных систем, необходим некоторый универсальный единообразный способ задания динамики объектов. Таким способом, как показано в данной работе, могут стать сети Петри.

Введем класс объектов Петри-имитатор (PetriSim) как класс, который реализует имитацию некоторого реального объекта в соответствии с динамикой функционирования, заданной временной сетью Петри с конфликтными и многоканальными переходами (рис. 1).

Petri_Sim
— Net: Petri_net
— timeModeling: double
+ Do_T()
+ Start()
+ NextEvent()
+ DoStatistica()

Рис. 1. Основные поля и методы класса Петри-имитатор

Информация о сети Петри содержится в поле Net Петри-объекта. Метод Start() выполняет вход маркеров в переходы для начальной сети Петри в соответствии с преобразованием $\left(D^{-}\right)^{m}$. Метод NextEvent() осуществляет преобразование $\left(D^{-}\right)^{m} \circ D^{+}$ сети Петри, соответствующее моменту времени t_n, и продвигает время в следующий момент времени t_{n+1}. Метод DoStatistica() содержит алгоритм сбора информации о среднем количестве маркеров в позициях и среднем количестве маркеров в переходах. Для размещения информации о дополнительных действиях, которые выполняются при выходе маркеров из переходов, служит метод DoT().

<u>Определение.</u> Объекты моделирования, являющиеся наследниками объекта Петри-имитатор (PetriSim), назовем *Петри-объектами (*PetriObj*):*

$$\text{PetriObj} \xrightarrow{inherit} \text{PetriSim} \qquad (17)$$

Применение механизма наследования обеспечивает воссоздание всех полей и методов супер-объекта в саб-объекте. Сеть Петри объекта создается с помощью статичной функции класса NetLibrary и затем передается конструктору Петри-объекта в качестве аргумента. Конструктор Петри-объекта размещает переданную сеть Петри в поле PetriNet. Такой подход обеспечивает возможность использования одной и той же функции из класса NetLibrary для создания сетей Петри множества однотипных объектов, что, в свою очередь, гарантирует однотипность обращения к позициям и переходам таких объектов.

Петри-объекты, во-первых, владеют всеми свойствами обыкновенного объекта (как элемента ООП), во-вторых, имитируют функционирование объекта на основе сети Петри, описание которой содержится в поле PetriNet, в-третьих, являются конструктивными элементами, из которых составляется сеть Петри сложной системы.

Конструирование модели системы из Петри-объектов

Пусть модель системы состоит из Петри-объектов $Model = \{O_j\}$, $O_j \xrightarrow{inherit} \text{PetriSim}$, принадлежащих классам C_i: $O_j \subset C_i$. Пример диаграммы классов модели, составленной таким способом, представлен на рис. 2. Модель может быть составлена как непосредственно из Петри-объектов, так и из объектов-наследников Петри-объектов или из объектов, которые агрегируют Петри-объекты.

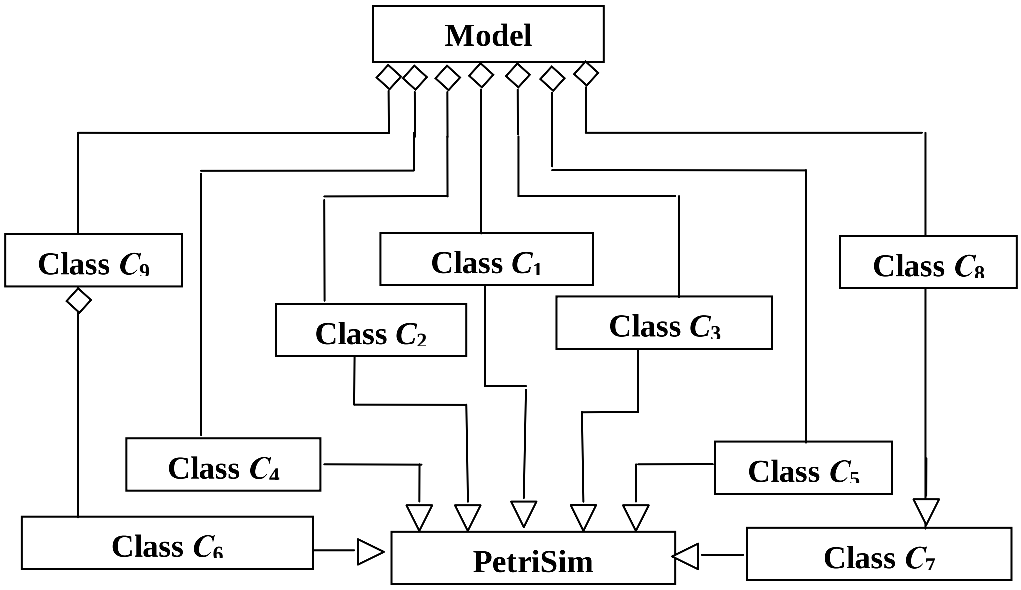

Рис. 2. Диаграмма классов модели системы

Сеть Петри объекта O_j, содержащуюся в его поле PetriNet, обозначим N_j: $N_j = (\mathbf{P}_j, \mathbf{T}_j, \mathbf{A}_j, \mathbf{W}_j, \mathbf{K}_j, \mathbf{I}_j, \mathbf{R}_j)$.

Связи Петри-объектов между собой осуществляются двумя способами:

1) с помощью общих позиций (например, позиция-счетчик либо позиция-ресурс):

$$\exists P \in \mathbf{P}_k \bigcap \mathbf{P}_l \tag{18}$$

2) с помощью *инициализации событий* (из перехода объекта O_k передаются маркеры в позиции других объектов O_l в заданном количестве $w_{k,l}$):

$$\begin{aligned} &\exists T \in \mathbf{T}_k, \exists P \in \mathbf{P}_l : \\ &M_P^+(t_n) = M_P(t_n) + Y(T, t_n) \cdot w_{k,l} \end{aligned} \tag{19}$$

Алгоритмически существование общих позиций обеспечивается совпадением адресов памяти, где хранятся значения маркировок соответствующих позиций. Таким образом, общие позиции характеризуются общим доступом к значению маркировки этой позиции разных Петри-объектов.

Инициализация событий алгоритмически реализуется при запуске дополнительных действий, соответствующих выходу маркеров из перехода, методом DoT(). Тогда инициализацию событий можно выполнить не только для нескольких объектов, но и для множества объектов с помощью цикла. Уравнения (19) дополняют уравнения (4) преобразования D^+, а значит, математически инициализация событий переходом объекта O_k означает добавление к множеству выходящих позиций этого перехода еще одной позиции, принадлежащей объекту $O_l \neq O_k$:

$$w_{k,l} > 0 \Leftrightarrow \left(\exists T \in \mathbf{T}_k, \exists P \in \mathbf{P}_l : P \in T^{\bullet}\right) \tag{20}$$

Поставим в соответствие всякой передаче маркеров из перехода одного объекта в позицию другого дугу $(T, P) : T \in \mathbf{T}_k, P \in \mathbf{P}_l, w_{k,l} > 0$, и обозначим множество всех таких дуг объекта O_k $U_k = \{(T, P) \mid T \in \mathbf{T}_k, P \in \mathbf{P}_l, w_{k,l} > 0\}$, а соответствующие этим дугам значения кратностей $\mathbf{w}_k = \{(T, P) \mid T \in \mathbf{T}_k, P \in \mathbf{P}_l, w_{k,l} > 0\}$. Тогда сеть Петри модели системы, составленная из сетей Петри-объектов, имеет вид:

$$PetriNet = \left(\bigcup_j N_j\right) \bigcup U_j \tag{21}$$

где U_j – множество дуг, вдоль которых объект O_j осуществляет инициализацию событий в других объектах, а объединение сетей Петри понимается в смысле объединения множеств ее позиций, переходов, дуг, кратностей, значений для решения конфликта, временных задержек в переходах:

$$\begin{gathered} \bigcup_j N_j : \ \mathbf{P} = \bigcup_j \mathbf{P}_j, \ \mathbf{T} = \bigcup_j \mathbf{T}_j, \ \mathbf{A} = \bigcup_j \mathbf{A}_j, \\ \mathbf{W} = \bigcup_j \mathbf{W}_j, \ \mathbf{K} = \bigcup_j \mathbf{K}_j, \ \mathbf{R} = \bigcup_j \mathbf{R}_j . \end{gathered} \tag{22}$$

Связи (18), (19) обеспечивают, что модель, которая конструктивно состоит из Петри-объектов, описывается сетью Петри

$$PetriNet = (\mathbf{P}, \mathbf{T}, \mathbf{A}, \mathbf{W}, \mathbf{K}, \mathbf{R}) \tag{23}$$

$$\mathbf{P} = \bigcup_j \mathbf{P}_j,\ \mathbf{T} = \bigcup_j \mathbf{T}_j,\ \mathbf{A} = \bigcup_j \left(\mathbf{A}_j \cup U_j\right),$$
$$\mathbf{W} = \bigcup_j \left(\mathbf{W}_j \cup \mathbf{w}_j\right),\ \mathbf{K} = \bigcup_j \mathbf{K}_j,\ \mathbf{R} = \bigcup_j \mathbf{R}_j. \qquad (24)$$

Таким образом, конструирование модели из Петри-объектов обеспечивает, что функционирование модели описывается сетью Петри (23), являющейся объединением сетей Петри объектов, из которых она состоит.

Алгоритм имитации Петри-объектной модели состоит из следующих действий:

- Формировать список Петри-объектов;
- Осуществить вход маркеров в переходы Петри-объектов (Start());
- Пока не достигнут момент окончания моделирования
  - продвинуть время в момент ближайшего события;
  - определить список конфликтных объектов и выбрать объект из списка конфликтных объектов;
  - для выбранного объекта выполнить выход маркеров из переходов (Do_T(), StepEvent());
  - для всех других объектов осуществить вход маркеров в переходы (Start()).
- Вывести результаты моделирования.

Петри-объектная модель учебного процесса вуза

Технология конструирования модели из Петри-объектов возникла и апробировалась при разработке модели системы управления учебным процессом вуза [10]. На рис. 3 изображена Петри-объектная модель системы управления учебным процессом вуза, составленная из следующих Петри-объектов: Дисциплина, Студент, Преподаватель, Группа, Деканат, Контроль задолженностей. Как следует из этого примера, Петри-объекты представляют структурные элементы системы, очень часто являющиеся очевидными структурными единицами системы, которая исследуется.

Рассмотрим Петри-объект Дисциплина, который представляет изучение дисциплины в соответствии с учебным планом специальности (рис. 4). Общие с объектом Расписание позиции «Начало семестра», «Продолжается экзаменационная сессия» обеспечивают начало обучения и проведение экзамена по дисциплине в установленные деканатом временные интервалы. Для связи с этими позициями используются информационные связи, обозначенные пунктирными линиями. Использование информационных связей для моделирования систем управления описано в [11]. Общая позиция «Преподаватель» позволяет контролировать занятость преподавателя, например, другими дисциплинами.

Инициализация событий происходит в переходах Начало лекции (лабораторной работы, практического занятия), Модульный контроль, Защита лабораторной работы, Экзамен. Например, в результате запуска перехода Начало лекции передаются маркеры в позицию «Есть пара по расписанию» Петри-объекта Преподаватель и Петри-объекта Студент, что создает условия для выполнения событий «Проводит занятие по расписанию» Преподавателя и «Посещает занятие» Студента. Заметим, что при этом передача маркеров осуществляется во все Петри-объекты Студент, относящиеся к объекту Группа.

Метод DoT() в применении к модели учебного процесса, кроме передачи маркеров, содержит также действия, связанные с записями в журнал успеваемости и журнал посещаемости.

Правильность функционирования Петри-объекта сильно зависит от значений, задающих приоритет и вероятность запуска переходов.
Например, событие «Начало лекции» и событие «Модульный контроль» при определенных условиях могут оказаться конфликтными. Так как в учебном процессе проведение занятий по расписанию является обязательным, то следует установить большее значение приоритета для перехода «Начало лекции».

Отметим, что создание модели системы управления учебного процесса с помощью Петри-объектов позволило воспроизвести такие процессы, как проведение занятий в группах

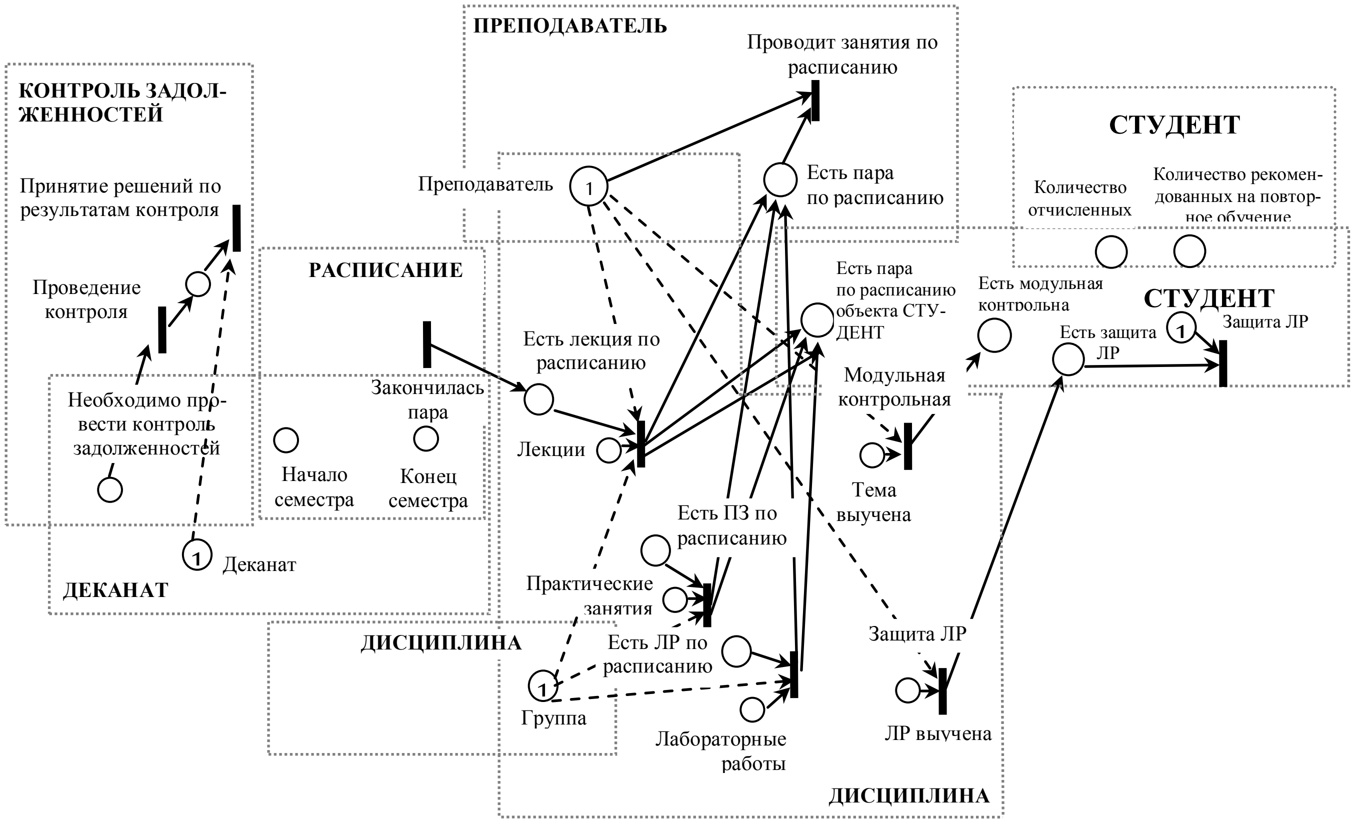

Рис. 3. Петри-объектная модель учебного процесса вуза

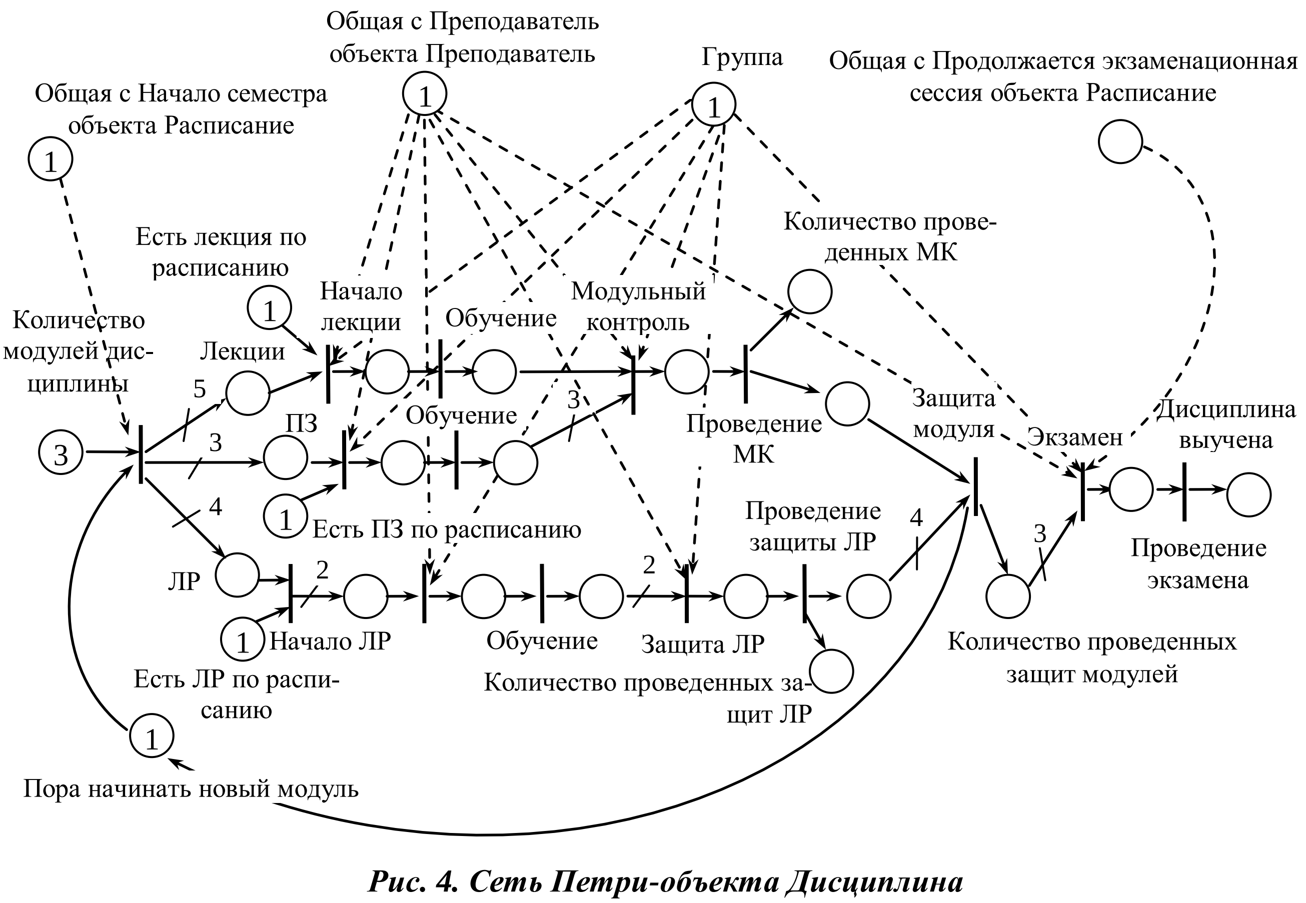

Рис. 4. Сеть Петри-объекта Дисциплина

студентов по расписанию, прием задолженностей преподавателями, сдача задолженностей по разным дисциплинам студентами, допуск студентов к сессии деканатом, принятие решений деканатом об отчислении студента или допуске к пересдаче.Реализация Петри-объектной модели учебного процесса выполнена средствами языка программирования Java (J2SE) и интегрированной среды Netbeans IDE 6.5. Верификация модели и результаты моделирования подтвердили правильность функционирования модели.

Заключение

В результате научного исследования получены уравнения состояний временной стохастической сети Петри с многоканальными и конфликтными переходами, которые отличаются от известных уравнений состояний временной сети Петри с детерминированными задержками, во-первых, понятием состояния перехода, во-вторых, наличием уравнения, задающим продвижение времени.

Введено понятие Петри-объекта и разработана технология конструирования Петри-объектных моделей, при которой объекты моделирования создаются с использованием механизма наследования на основе класса объектов Петри-имитатор.

Моделирование системы с помощью Петри-объектов позволяет исследователю сосредоточиться на составлении сетей Петри элементов системы. При этом сеть Петри-объекта отображает поведенческие свойства элемента системы. Отладка Петри-объектов может быть выполнена до объединения в систему и не сложна, если Петри-объект достаточно простой. Только после отладки Петри-объектов, представляющих элементы системы, выполняется конструирование модели системы.

Подход к построению модели, который предлагается, позволяет быстро конструировать модели сложных систем и обеспечивает сокращение затрат времени на отладку и реализацию имитационных моделей больших систем. Технология апробирована на примере Петри-объектной модели системы управления учебным процессом вуза.

Список литературы

1. Ямпольський Л.С., Лавров О.А. Штучний інтелект у плануванні та управлінні виробництвом. – К.:Вища шк., 1995. - 255с.
2. Стеценко І.В., Бойко О.В. Система імітаційного моделювання засобами сіток Петрі // Математичні машини і системи. – Київ, 2009. – №1. – С.117-124.
3. Dmitriy A. Zaitsev Functional Petri net // Universite Paris Paris-Dauphine. – Cahier N 224. – mars 2005. – P.1-62.
4. Charles Lakos Object Oriented Modeling with Object Petri Nets // Concurrent Object-Oriented Programming and Petri Nets. - 2001. - P. 1-37.
5. Lakos, C., Keen, C. LOOPN++: a new language for object-oriented Perti nets, Technical Report R94-4, Networking Research Group, Univesity of Tasmania,Australia, April 1994.
6. Hue Xu Timed Hierarchical object-oriented Petri net // Petri Net, Theory and Applications, Book edited by: Vedran Kordic. – I-Tech Education and Publishing, Vienna, Austria. – 2008. – P.253-280.
7. Hong,J.E., Bae D.H. High-level Petri net for incremental specification of object-oriented system requirements // Institution of Engineering and Technology, IEEE Proceedings – Software. – 2001. – Vol. 148, No.1 – P.11-18.
8. Murata T. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications. // Proceedings of IEEE. – 1989. - Vol.77, No.4. – P.541-580.
9. Зайцев Д.А. Инварианты временных сетей Петри // Кибернетика и системный анализ. - 2004. – № 2. – С. 92-106.
10. Стеценко І.В. Імітаційне моделювання системи управління навчальним процесом ВНЗ з використанням об'єктно-орієнтованого підходу // П'ята науково-практична конференція з міжнародною участю «Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС'2010'». Тези доповідей. – Київ. – 2010. – 21-25 червня 2010р. – С.134-135.
11. Стеценко І.В. Моделювання систем: навч. посіб. [Текст] / Стеценко І.В.; М-во освіти і науки України, Черк. держ. технол. ун-т. - Черкаси: ЧДТУ,2010. – 399с.
12. Jinzhong Niu, Jing Zou, Aihua Ren OOPN: an object-oriented Petri nets and its integrated development environment [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.sci.brooklyn.cuny.edu/~jniu/research/publications/files/sea03-oopn.pdf.